



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Glass reflow process를 이용한 평면오목렌즈 제작

Fabrication method of plano concave lens using
glass reflow process

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

김 민 성

Glass reflow process를 이용한 평면오목렌즈 제작

지도 교수 전 국 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

김 민 성

김민성의 공학석사 학위论문을 인준함

2017 년 8 월

위 원 장 _____ 김 용 권 _____ (인)

부위원장 _____ 전 국 진 _____ (인)

위 원 _____ 김 성 재 _____ (인)

초 록

Glass reflow process를 이용한 평면오목렌즈 제작

서울대학교 대학원

전기정보공학부

김민성

렌즈란 굴절률이 다른 매질을 빛이 통과할 때 굴절하는 성질을 이용하여 빛을 모으거나 분산시켜 상을 확대하거나 축소하는 도구이다.

이러한 성질을 가지는 렌즈는 일상생활, 과학연구, 의료, 우주항공 분야등 매우 많은 분야에서 사용되고 있으며 그 사용 영역은 더욱더 확대되고 있다. 일반적으로 렌즈는 연삭 공정을 통해 표면을 갈아서 형성하는데 크기가 작은 마이크로 렌즈의 필요성이 점차 커짐에 따라 반도체 공정을 이용한 제작법에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그 중에서도 감광막, PDMS(Polydimethylsiloxane)와 같은 폴리머를 이용한 렌즈제작에 대한 연구가 많이 이루어졌으며 글래스를 이용하여 렌즈를 제작하는 방법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 글래스를 이용한 렌즈 제작 방법에 대한 연구는 볼록렌즈 제작법에 관한 비중이 높으며 볼록렌즈와 더불어 중요 광학 부품 중 하나임에도 불구하고 오목렌즈를 제작하는 방법에 대한 연구는 부족한 것이 사실이다.

본 논문은 반도체 공정을 이용하여 오목렌즈를 제작하는 방법에 관한 것으로 아직 시도되지 않은 글래스 리플로우 공정을 이용하여 구조의 크기를 컨트롤 하였다. 이를 위해 렌즈에 관한 광학 공식을 이용하여 렌즈를 설계하고 설계한 렌즈를 제작하기 위해 하나의 마스크와 글래스 리플로우를 이용하여 아래와 같이 오목렌즈를 제작하였다.

한 장의 실리콘 웨이퍼는 $170\mu\text{m}$ 의 캐비티를 DRIE(Deep Reactive

Ion Etching)로 형성하고 또 다른 실리콘 웨이퍼는 $2000\mu\text{m}$ 의 지름을 가지는 실린더의 관통공정을 진행한다. 이렇게 준비된 실리콘 웨이퍼와 Pyrex7740 글래스 웨이퍼는 양극 접합을 진행한 후 글래스 웨이퍼가 변형될 수 있도록 675°C 에서 5분간 글래스 리플로우를 진행한다. 이 때 Pyrex7740 글래스 웨이퍼의 위에 양극 접합되어 렌즈의 지름을 결정할 관통 실리콘 웨이퍼와 Pyrex7740 글래스 웨이퍼 아래쪽에 양극 접합된 아래쪽 실리콘 웨이퍼와의 압력차이가 렌즈를 형성하게 된다. 이렇게 제작된 렌즈의 표면형상은 알파스텝을 이용하여 측정하였으며 렌즈의 새그(sag height)값과 지름은 렌즈에 크롬을 증착한 뒤 현미경 깊이 측정기를 이용하여 측정하였다. 이렇게 측정된 평면 오목렌즈는 각각 평균 지름 $2008\mu\text{m}$, 평균 새그값 $163.8\mu\text{m}$, 평균 초점거리 -6.7mm 를 갖는다.

본 논문은 MEMS공정을 통하여 단일한 공정조건에서 렌즈를 형성할 수 있으며 mm단위의 크기를 갖는 오목렌즈를 제작하는 새로운 방법을 제안하였다.

주요어 : Plano concave lens, Glass reflow process, Triple anodic bonding, Lens equation

학 번 : 2015-20894

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 렌즈의 개요	1
제 2 절 렌즈 제작 연구 동향	4
제 3 절 렌즈 제작 연구의 필요성	17
제 4 절 논문의 구성	17
 제 2 장 설계 및 제작	19
제 1 절 렌즈 설계	19
제 2 절 공정 설계	25
제 3 절 제 작	29
 제 3 장 측정 및 분석	35
제 1 절 측정 방법	35
제 2 절 측정 결과	36
 제 4 장 결 론	39
 참고문헌	41
Abstract	42

표 목차

표 1.1 기존 렌즈 제작 연구 동향.....	16
표 2.1 Pyrex7740 웨이퍼의 물질 특성	30
표 2.2 1차 DRIE 공정 결과	32
표 2.3 DRIE 최종 결과.....	33
표 3.1 측정에 사용된 장비.....	35
표 3.2 오목렌즈의 새그값과 지름 측정결과.....	38
표 3.3 오목렌즈의 초점거리 측정결과.....	38

그림 목차

그림 1.1	DVD에 사용되는 렌즈.....	1
그림 1.2	광통신에 사용되는 렌즈	2
그림 1.3	차량용 블랙박스.....	3
그림 1.4	자동차 전방거리측정용 카메라의 화각과 탐지거리	3
그림 1.5	$\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 졸겔을 이용한 오목렌즈 어레이 제작 모식도.....	5
그림 1.6	PDMS와 글리세롤을 이용한 비구면 렌즈.....	7
그림 1.7	실리콘 몰드와 PMMA를 이용하여 만든 볼록렌즈.....	9
그림 1.8	글래스 리플로우를 이용한 볼록렌즈 제작 흐름도.....	10
그림 1.9	글래스 리플로우를 이용하여 제작한 볼록렌즈.....	11
그림 1.10	글래스 플로우 프로세스를 이용하여 제작한 볼록렌즈	11
그림 1.11	글래스 플로우 프로세스를 이용한 밀리미터 사이즈의 볼록렌즈 어레이	12
그림 1.12	레이저 패터닝과 습식 식각을 이용한 렌즈제작 흐름도.....	14
그림 1.13	레이저 패터닝과 등방성 습식 식각을 이용하여 제작한 오목렌즈	15
그림 2.1	구면에서의 굴절	19
그림 2.2	얇은 렌즈에서의 굴절.....	21
그림 2.3	렌즈의 곡률반경, 지름, 새그값의 관계.....	24
그림 2.4	설계한 렌즈의 치수	25
그림 2.5	글래스 플로우 프로세스의 온도-시간 그래프.....	27
그림 2.6	설계한 공정의 3차원 모식도	28

그림 2.7 공정 흐름도.....	29
그림 2.8 산화막 식각이 끝난 후 패턴.....	32
그림 2.9 삼층 양극 접합이 완료된 후.....	33
그림 2.10 최종 제작된 평면 오목렌즈	34
그림 3.1 제작한 렌즈를 통해 촬영한 이미지	36
그림 3.2 현미경을 통해 본 평면 오목렌즈	36
그림 3.3 평면 오목렌즈에 의해 레이저 광선이 굴절된 모습	37
그림 3.4 렌즈의 표면 형상	37

제 1 장 서 론

제 1 절 렌즈의 개요

렌즈란 빛이 굴절률이 다른 매질을 통과할 때 굴절하는 성질을 이용하여 빛을 모으거나 분산시켜 상을 확대하거나 축소하는 도구이다. 이러한 렌즈는 일상생활에서부터 산업현장, 과학, 의료분야까지 매우 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다.

렌즈가 사용되는 적용 분야 중 하나인 정보저장장치의 대표적인 것은 CD, DVD이다. CD나 DVD는 우리가 필요로 하는 정보를 읽고 쓰는 저장매체이다. 기본적으로 CD나 DVD는 디스크 표면에 홈집을 내어 데이터를 저장하고, 이렇게 저장한 데이터는 레이저를 쏘아 반사된 빛을 통해 읽게 된다. 이 때 디스크 표면으로 빛의 초점이 맺혀야 하는데 이럴 때 렌즈가 빛을 모으는 역할을 한다.

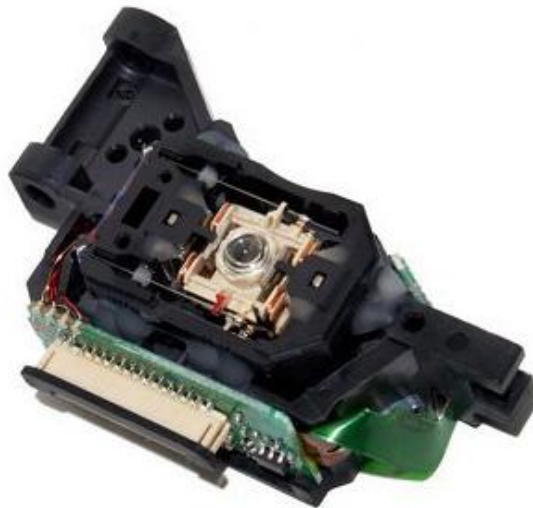


그림 1.1 DVD에 사용되는 렌즈 부품

수 Gbps의 속도를 갖고 전 세계 네트워크를 연결하는데 사용하는 광통신에서의 핵심 기술 또한 렌즈이다. 기본적으로 광통신은 필요한 데이터를 광신호에 실어서 전송하게 되는데 이 때 전송하는 광신호는 빛의 반사와 굴절 특성을 이용하여 전반사됨으로써 데이터의 손실을 최대한 줄인다. 전반사를 이용하기 때문에 광섬유의 반사 임계각 이상으로 빛을 발광하는 것이 중요한데 이 때 사용하는 것이 광통신 모듈에 사용하는 렌즈이다. 광통신 모듈의 송신단, 수신단에 렌즈를 삽입함으로써 광신호의 손실을 줄여 효율을 증대시키는 역할을 한다.



그림 1.2 광통신에 사용되는 렌즈

자동차 분야에서도 렌즈는 많이 사용되고 있다. 차량용 블랙박스는 최근 자동차에 있어서 없어서는 안될 필수품으로 자리잡고 있다. 차량용 블랙박스는 광범위한 영역의 피사체를 선명하게 담아하기 때문에 차량용 블랙박스에서 넓은 화각을 갖는 렌즈는 매우 중요한 역할을 한다고 할 수 있다.



그림 1.3 차량용 블랙박스

자동차 전방거리측정용 카메라에도 렌즈가 삽입된다. 최근 들어 자율주행자동차에 대한 관심이 높아지면서 카메라 비전을 이용하는 거리측정센서에 대한 관심도 높아지고 있다. 카메라 비전을 이용한 전방거리측정은 기본적으로 카메라를 이용하기 때문에 안에 삽입되는 렌즈의 역할도 매우 중요하다고 할 수 있다. 그림 1.4와 같이 전방거리측정용 카메라는 전방탐지거리, 탐지하는 화각등이 매우 중요한데 카메라에 사용되는 렌즈는 자동차전방의 화각, 탐지거리, 이미지의 화질 등에 지대한 영향을 주기 때문에 렌즈의 역할을 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

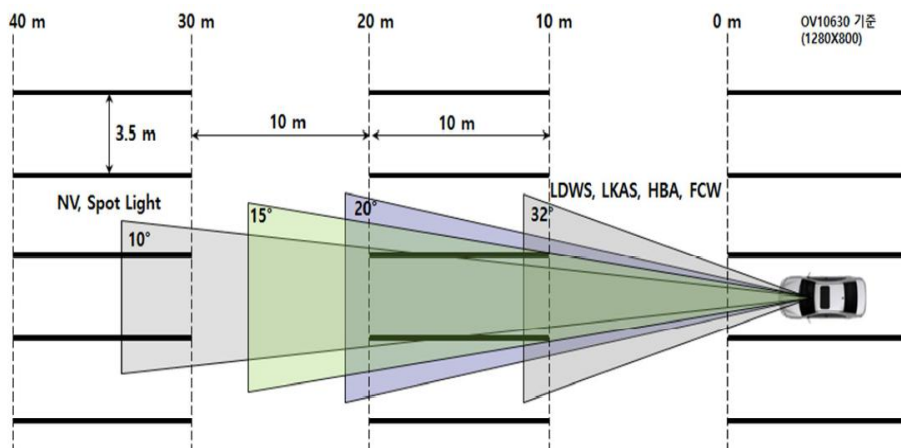


그림 1.4 자동차 전방거리측정용 카메라의 화각과 탐지거리

또 다른 적용분야로는 광 바이오 센서가 있다. 광 바이오 센서는 바이오 센서의 한 종류로 측정하고자 하는 대상 물질이 발색을 일으킬 수 있도록 광물질로 염색한 뒤 빛을 감지하는 광 소자를 이용해 인지하는 센서를 말한다. 이러한 원리를 갖고 있기 때문에 측정하고자 하는 물질에서 나오는 빛을 측정하기 위해서 빛을 수광하는 광학 부품이 중요하다고 할 수 있으며 광학 부품에 삽입되는 여러 구성물 중에서도 렌즈의 역할이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

다양한 적용분야에서 중요한 역할을 담당하고 있는 렌즈는 폴리머의 리플로우 현상을 이용한 방법[1-3], 마이크로잉크젯[4][5], 실리콘 몰드를 이용한 핫엠보싱[6][7], CO₂ 기체를 이용하여 폴리머를 연화시킨 뒤 몰드를 이용하여 제작하는 방법[8][9], 그레이스케일 마스크를 이용한 방법[10][11], 실리콘 몰드와 글래스 리플로우를 결합한 방법[12], 글래스 리플로우[13-16] 레이저 패터닝과 습식 식각을 이용한 방법[17][18] 등 여러 선행 연구에서 다양한 방법으로 제작 되었다.

제 2 절 렌즈 제작 연구 동향

본 논문은 글래스를 이용한 평면 오목 렌즈 제작법에 관한 논문이기 때문에 1장 2절에서는 현재까지 진행된 다양한 렌즈 제작방법에 대해서 중점적으로 서술하였다.

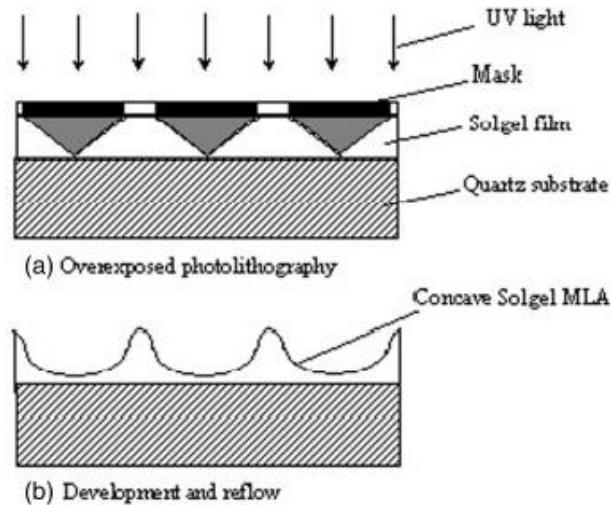


그림 1.5 $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 졸겔을 이용한
오목렌즈 어레이 제작 모식도[2]

그림 1.5는 $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 으로 구성된 졸겔을 이용하여 마이크로 오목렌즈 어레이제작의 모식도이다[2]. 이 연구에서 오목형태의 굴절형 마이크로렌즈를 만들기 위해서 과노출 사진공정(Overexposure photolithography)과 단순한 리플로우를 조합한 근접효과를 통한 리플로우 기술이라는 방법을 사용하였다. 이 방법은 식각 과정이 없이 하나의 공정단계를 이용하여 제작하기 때문에 공정과정이 간단하며 비용적인 측면에서도 효율적이라고 할 수 있다.

$0.1\mu\text{m}$ 의 구멍을 갖는 필터를 통해 한번 걸러진 $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 졸겔을 쿼츠 기판 위에 2000rpm에서 30초 동안 스핀 코팅한다. 그 후 잔여 솔벤트를 제거하고 접착력을 증가시키기 위해 80°C 에서 소프트

베이킹을 5분간 진행한다. 그리고 크롬 마스크를 이용하여 졸겔에 UV로 40분간 사진공정을 진행한다. 이 때 마스크와 박막 사이의 경계면에서의 결함으로 인해 소량이 빛이 회절하거나 산란하여 원치 않는 곳에 패터닝이 되는 근접 현상이 생길 수 있다. 보통의 사진공정에서는 이 근접 효과는 원치 않는 현상이나 이 연구에서는 근접효과를 적극 이용하였다. 이 연구에서 근접 효과를 활용한 부분에 대한 모식도를 그림 1.5에 나타내었다. 그리고 20초 동안 아세톤을 이용하여 원하는 부분만 남기고 현상한다. 이렇게 현상된 웨이퍼를 퍼니스에 넣어 230℃에서 200분간 리플로우를 진행한다.

이렇게 완성된 마이크로 렌즈를 레이저 간섭계를 이용하여 표면의 형상을 측정하였고, 그 결과 $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 졸겔을 이용하여 제작한 오목렌즈는 $5.2\mu\text{m}$ 의 지름과 $2.04\mu\text{m}$ 의 새그값을 가졌다.

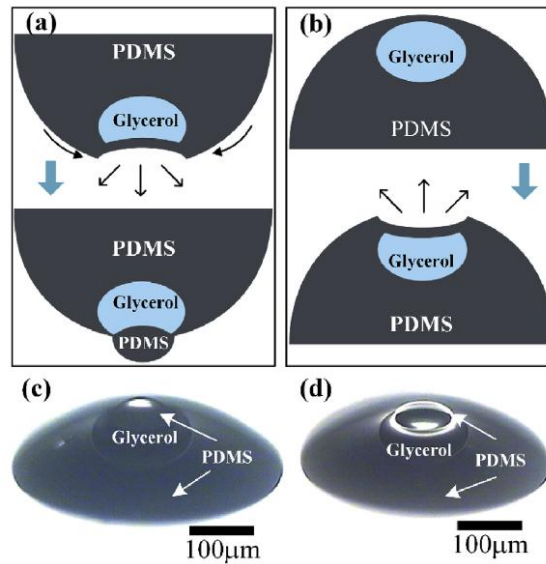


그림 1.6 PDMS와 글리세롤을 이용한 비구면 렌즈[5]

마이크로 잉크젯과 폴리머 경화를 이용하여 폴리머 마이크로렌즈를 제작하는 방법도 제안되었다[5].

기판으로 사용되는 실리카 글래스 웨이퍼 위에 테플론 박막을 60초 동안 1500rad/min의 속도로 스핀 코팅한다. 테플론 박막이 올라간 실리카 글래스를 퍼니스안에서 380℃에서 10분간 어닐링 한다.

어닐링된 테플론 박막위에 글리세롤 방울을 형성한 뒤 그 위에 PDMS 방울을 형성하여 글리세롤 방울을 감쌀 수 있도록 한다. 이후 실리카 글래스 웨이퍼를 40분간 뒤집어 놓음으로써 글리세롤 방울이 PDMS 방울 안에서 떠 있을 수 있도록 한 뒤 PDMS를 경화시킨다. 이 때 볼록한 모양을 만들기 위해서는 PDMS 렌즈가 아래로 가게 실리카 글래스 웨이퍼를 뒤집은 채로 90℃ 에서 50분간 경화를, 오목한 모양의 렌즈를 만들기 위해 PDMS 렌즈가 위로 가게 실리카 글래스를 놓고 110℃ 20분간 경화시킨다.

이 공정의 결과 지름 128.5μm와 새그값 14μm의 PDMS 평면 볼록렌즈, 지름 296.3μm와 새그값 87μm의 글리세롤 평면 볼록렌즈가 완성되었다.

위의 제안된 방법은 단순하고 효과적이며 큰 개구수를 가지는 렌즈 제작에 적합하다는 장점을 가지고 있다.

실리콘 몰드와 핫 엠보싱방법을 이용하여 PMMA(Polymethyl methacrylate) 렌즈를 제작하는 방법도 제안되었다[7]. 실리콘 몰드와 핫 엠보싱을 이용하여 렌즈를 제작하는 첫 번째 단계는 실리콘 습식 식각에 사용할 하드 마스크를 만드는 것이다. 실리콘 웨이퍼 위에 $0.5\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 열 산화막과 100nm 의 두께를 가지는 실리콘 질화막을 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 증착한다. 실리콘 질화막에 패터닝을 하기 위해 추가로 100nm 두께를 가지는 니켈/크롬 합금을 evaporator를 이용하여 실리콘 질화막 층위에 증착한다. 그리고 양각 사진 공정을 이용하여 패터닝한다. 니켈/크롬 합금층 위에 패터닝이 생겨 열리게 되었을 때, 이것은 RIE(Reactive Ion Etching)를 이용하여 실리콘 질화막 마스크 위에 전사된다. 그리고 니켈크롬 합금층은 제거된다. 남아있는 실리콘 산화막은 buffered HF 용액을 이용하여 패터닝한다. 실리콘 질화막 마스크는 실리콘 웨이퍼가 습식 식각되면 안 되는 부분을 보호하기 위해 사용된다.

다음 단계는 몰드를 형성하기 위해 실리콘 웨이퍼를 등방성 식각 용액에 담그는 것이다. 식각 용액은 49%의 HF와 60%의 HNO_3 를 1:9비율로 섞어서 만든다. 이 식각 용액에 대해서 식각 속도는 $10\mu\text{m}$ 의 지름에서 $1\mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도에서, $230\mu\text{m}$ 의 지름에서 $2\mu\text{m}/\text{min}$ 의 속도의 범위를 가진다. 45분 동안의 식각은 마스크가 $10\mu\text{m}$ 열리게 되는 영역에서는 $40\mu\text{m}$ (높이 $45\mu\text{m}$), $230\mu\text{m}$ 가 열리게 되는 영역에서는 $343\mu\text{m}$ (높이 $89\mu\text{m}$)를 가진다. 식각이 끝난 후 웨이퍼는 HF에 담가 하드 마스크를 제거하기 전에 DI(Deionized) water를 통해 클리닝된다. 그리고 하드 마스크는 HF를 통해 제거한다.

산 잔여물을 제거하기 위해 다시 DI water에 클리닝한 뒤 SPM(Sulfuric acid Peroxide Mixture) 클리닝을 진행한다. 마지막으로 DI water에 한번 더 클리닝하여 마이크로렌즈를 제작하기 위한 몰드 준비 과정을 끝낸다.

준비된 몰드에 핫 엠보싱을 이용하여 PMMA렌즈를 만든다. 이 때,

실리콘 몰드와 렌즈의 손상을 막기 위해 니켈 중간층을 전기 도금하여 증착한다. 니켈을 중간층으로 증착한 뒤 130℃의 온도와 4MPa의 압력을 이용하여 5분간 진행하여 공정을 완료한다. 비접촉 표면 형상 측정 장비를 이용하여 렌즈의 형상을 측정한 결과 핫 엠보싱방법으로 제작한 원형 마이크로렌즈는 262 μm 의 지름과 80 μm 의 새그값을 갖는다.

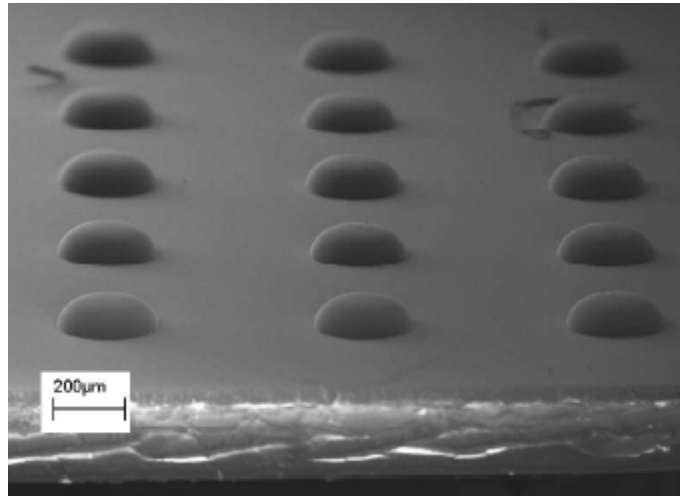


그림 1.7 실리콘 몰드와 PMMA를 이용하여 만든 볼록렌즈 [7]

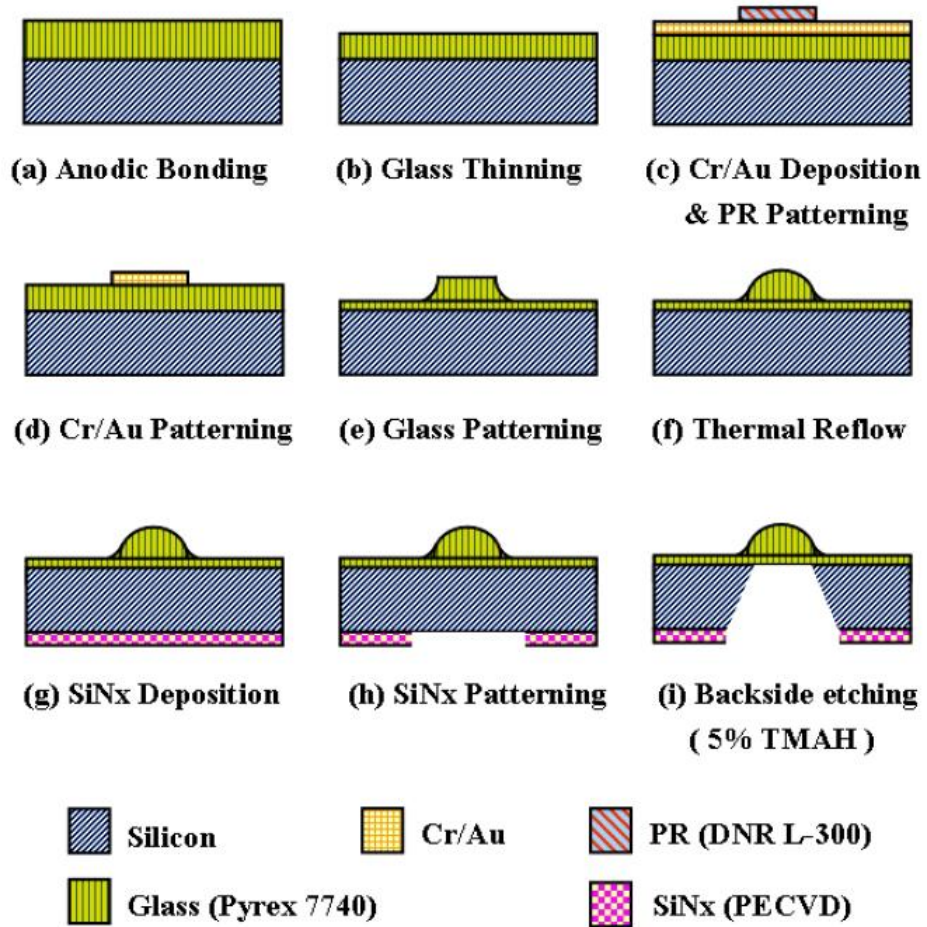


그림 1.8 글래스 리플로우를 이용한 볼록렌즈 제작 흐름도[13]

그림 1.8은 글래스를 리플로우하여 볼록렌즈를 제작하는 공정에 관한 흐름도를 나타낸 것이다[13].

글래스(pyrex7740)와 (100)방향의 실리콘 웨이퍼는 마이크로렌즈와 기관 물질로서 각각 사용되었다. 이것은 두 웨이퍼의 열 팽창계수가 유사하여 본딩 과정에서 생길 수 있는 문제를 줄일 수 있기 때문이다.

공정의 첫 번째 단계는 $200\mu\text{m}$ 의 글래스와 $500\mu\text{m}$ 의 실리콘 웨이퍼를 양극 접합하는 것이다. 양극 접합은 300°C 에서 450°C 범위의 온도, $400\sim 1000\text{V}$ 의 전압, 10분에서 30분 동안 진행한다. 양극 접합이 끝난 후 웨이퍼를 49%의 HF 용액에 21분간 담가 글래스 웨이퍼의 두께가 $50\mu\text{m}$ 가 되도록 한다. 그리고 글래스 웨이퍼를 패터닝할 수 있도록

크롬과 금을 스퍼터를 이용하여 증착한다. 감광막을 마스크로 크롬과 금을 습식 식각 하여 패터닝을 한 뒤 글래스를 5분간 습식 식각하여 $35\mu\text{m}$ 의 높이를 갖는 실린더 모양으로 만들어 준다. 실린더 모양으로 만들어진 글래스 패턴은 850°C 에서 20분간 리플로우한다. 마지막 단계는 마이크로렌즈 아래 실리콘을 사각형으로 열기 위한 실리콘 습식 식각이다. 실리콘 질화막은 감광막 마스크를 이용하여 RIE 패터닝한다. 패터닝된 실리콘 질화막은 실리콘 습식 식각의 마스크로 사용된다.

이러한 방법을 통해 $960\mu\text{m}$ 의 지름과 $43\mu\text{m}$ 의 새그값을 갖는 볼록렌즈를 만들었다.

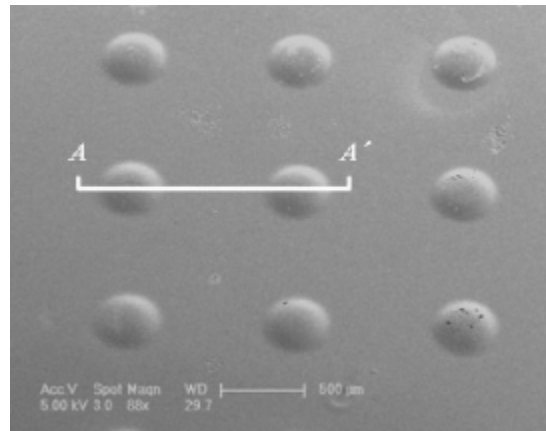


그림 1.9 글래스 리플로우를 이용하여 제작한 볼록렌즈 [13]

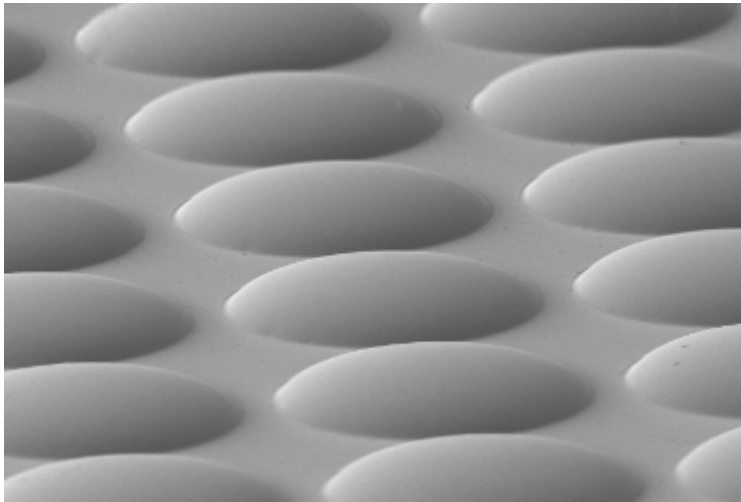


그림 1.10 글래스 플로우 프로세스를 이용하여 제작한 볼록렌즈[14]

GFP(Glass Flow Process)라고 명명한 글래스 리플로우를 이용한 렌즈 제작법은 P.Merz에 의해서 처음 제안되었다[14]. 6인치 실리콘 웨이퍼 위에 650nm의 산화막층을 증착한 뒤 양각 사진 공정을 이용하여 패터닝을 한다. 하드 마스크로 사용될 산화막을 건식 식각한 뒤 DRIE를 이용하여 실리콘 웨이퍼에 수백 μ m의 캐비티를 형성한다. 렌즈로 형성될 보로실리케이트 글래스 웨이퍼를 캐비티가 형성된 실리콘 웨이퍼와 420℃의 온도, 1200V의 전압, 7.5×10^{-1} Torr 의 진공도에서 양극 접합 한다. 양극 접합 후 600℃에서 800℃의 온도 범위에서 글래스 플로우 프로세스를 진행한다. 글래스 웨이퍼의 점도는 점차 감소하게 되고 대기압과 캐비티사이의 압력 차이로 인해 글래스는 실리콘 캐비티안으로 흘러내리게 된다. 글래스의 앞부분이 실리콘 캐비티의 바닥에 닿기 전에 리플로우를 멈춰 원형을 갖는 볼록렌즈가 되도록 한다.

마지막으로 실리콘 웨이퍼는 TMAH(Tetramethylammonium hydroxide) 습식 식각으로 제거가 되고 글래스 플로우 프로세스로 인해서 단차가 생긴 글래스 웨이퍼의 윗면은 CMP(Chemical Mechanical Planarization)로 인해 폴리싱된다. 이 연구에서는 600℃에서 800℃ 사이의 온도에서 다양한 시간을 실험하여 렌즈를

제작하였으며 제작한 렌즈는 라인 스캔 측정, 백색광 주사 간섭계, SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 렌즈의 형상을 측정하였다. 최종적으로 $900\mu\text{m}$ 의 지름과 $80\mu\text{m}$ 의 새그값을 갖는 볼록렌즈를 제작하였다.

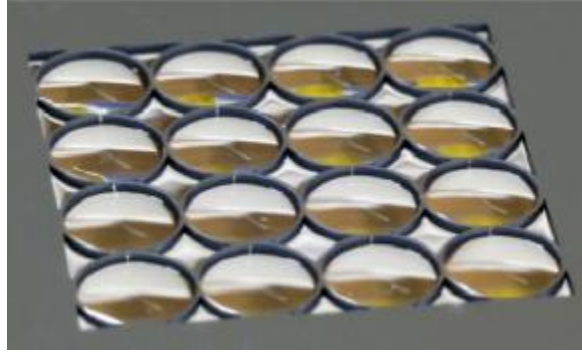


그림 1.11 글래스 플로우 프로세스를 이용한
밀리미터 사이즈의 볼록렌즈 어레이[15]

Jorge Alberro도 글래스 플로우 프로세스를 이용하여 밀리미터 크기를 갖는 볼록렌즈 어레이를 제작하였다[15]. $500\mu\text{m}$ 두께를 가지는 실리콘 웨이퍼에 $2.5\mu\text{m}$ 두께를 가지는 감광막 스펀 코팅하고 DRIE를 이용하여 $250\mu\text{m}$ 의 깊이를 가지는 실리콘 캐비티를 형성한다. 감광막은 아세톤과 초음파 세정기를 이용하여 제거하고, SPM 클리닝을 통하여 남아 있을 오염물을 제거한다. 4인치 보로실리케이트 글래스는 350°C 의 온도 $1.4 \times 10^{-3}\text{Torr}$ 의 진공도에서 캐비티가 형성된 실리콘 웨이퍼와 양극 접합한다. 본딩이 완료된 후 웨이퍼는 보로실리케이트 글래스의 녹는 점 이상 온도를 높인다. 그 결과 글래스의 점도는 낮아지게 되고 실리콘 캐비티안으로 글래스 웨이퍼가 들어가게 되면서 볼록렌즈 어레이가 만들어 지게 된다. 글래스 플로우 프로세스가 끝나고 난 후 글래스 웨이퍼의 뒷면을 폴리싱하고 글래스 아래쪽 실리콘을 캐비티가 열릴 수 있도록 폴리싱을 하면 공정이 완료된다.

이 연구에서는 이렇게 만들어진 볼록렌즈 어레이는 $1900\mu\text{m}$ 의 지름을 가지며 $80\mu\text{m}$, $115\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$, $180\mu\text{m}$ 의 새그값을 갖는 볼록렌즈 어레이 제작법을 실험하였다.

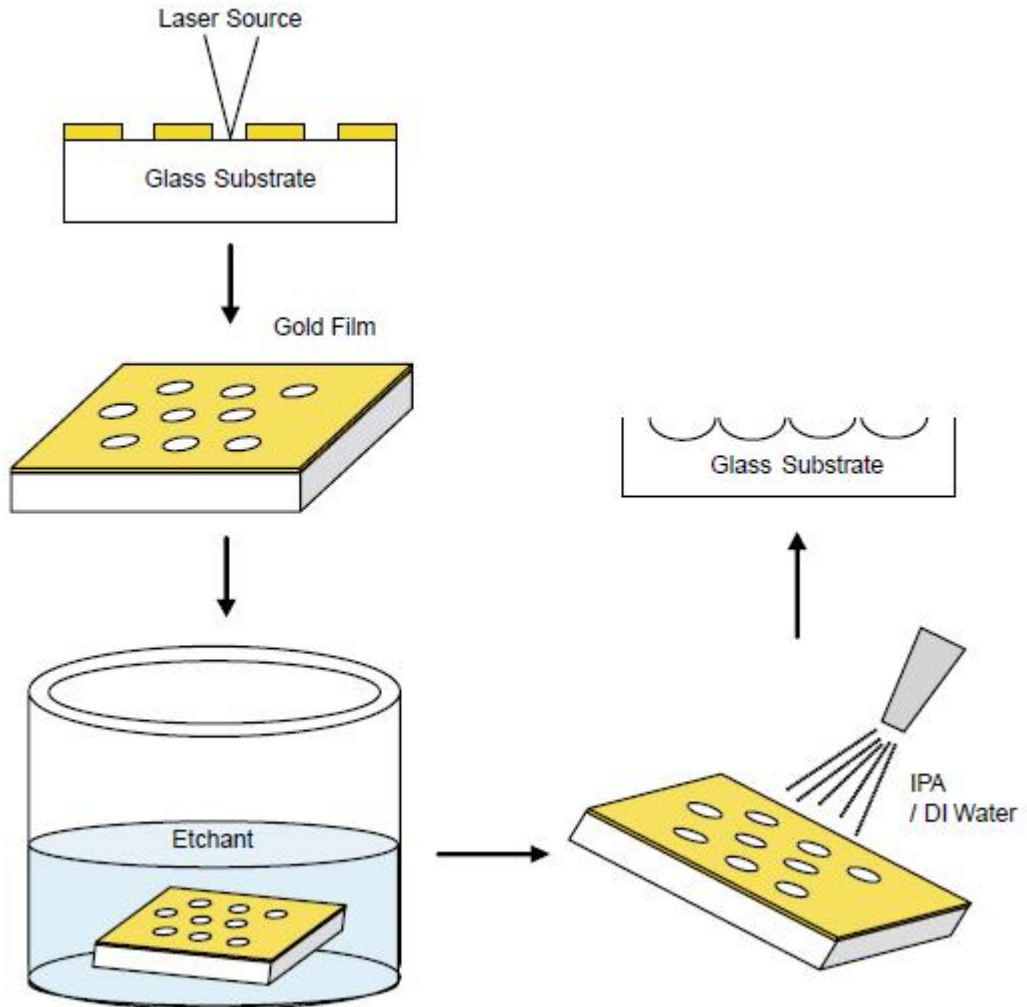


그림 1.12 레이저 패터닝과 습식 식각을 이용한 렌즈제작 흐름도[18]

그림 1.12은 글래스 오목렌즈 제작에 많이 사용되는 레이저와 등방성 습식식각을 이용한 오목렌즈제작 흐름도를 나타낸다[18]. 글래스 웨이퍼는 초음파 세정기를 이용하여 30분간 IPA 클리닝과 DI water 클리닝을 진행한다. 레이저 패터닝이 끝난 웨이퍼는 IPA를 이용하여 클리닝을 진행한다. IPA 클리닝을 진행한 뒤 웨이퍼는 150℃에서 90분간 건조과정을 거치게 된다. 이렇게 준비된 글래스 웨이퍼 위에 200nm의 두께를 갖는 금을 증착한다. 이 금 층은 레이저 패터닝과 HF 습식 식각 과정에서 마스크의 역할을 하게 된다.

레이저 패터닝에는 355nm의 파장을 갖는 AVIA third harmonic Nd:YAG 레이저가 사용되었다. 이 레이저는 3~5 μm 의 스팟 사이즈를 가지는 렌즈를 통과하여 웨이퍼에 크레이터를 형성한다. 이 때 레이저 식각 경로가 미리 프로그램되어 있는 컨트롤 PC에 의해 제어되는 스테이지를 이용한다. 이 연구에서는 100 μm , 50 μm , 20 μm 의 다양한 지름을 갖는 크레이터를 형성하여 실험하였다. 레이저를 이용하여 크레이터를 형성한 뒤 웨이퍼는 HF와 BHF를 다양한 농도로 혼합하여 습식 식각하였다. 습식 식각을 진행한 뒤의 웨이퍼는 10분간 DI water 클리닝을 진행한다. 그리고 습식 식각 과정에서 생긴 화학 반응물의 완전한 제거를 위하여 IPA를 이용한 초음파 세정을 15분 동안 진행한다.

제작한 렌즈는 알파스텝을 이용하여 2차원 표면현상을 측정하였고 측정된 결과는 렌즈의 지름 105.4 μm , 50.6 μm , 20.1 μm 이며 최대 새그값은 12.5 μm 를 갖는다는 것을 나타내었다.

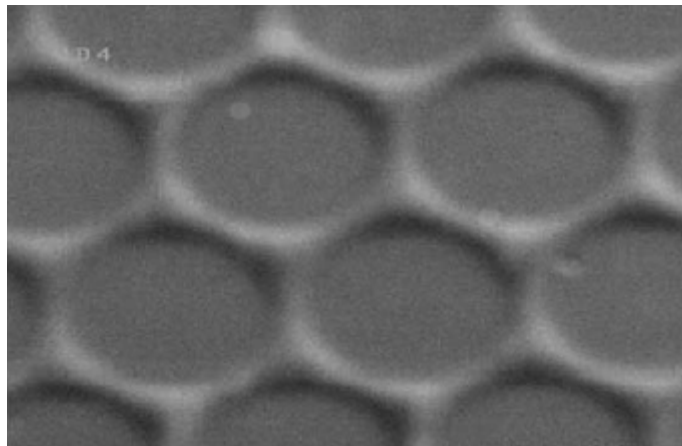


그림 1.13 레이저 패터닝과 등방성 습식식각을 이용하여 제작한 오목렌즈[18]

표1.1 기존 렌즈 제작 연구 동향

렌즈 제작 연구 동향				
발표기관	Nanyang Technology university	Harbin Institute of Technology	FEMTO-ST (UMR CNRS 6174)	National University of Singapore
렌즈 물질	SiO ₂ -ZrO ₂	PDMS+글리세롤	PMMA	글래스
제작방법	열 리플로우	마이크로잉크젯+경화	핫 엠보싱	레이저패터닝, 습식식각
렌즈 치수	지름: 5.2 μ m 새그값: 2.04 μ m	지름: 749.7 μ m	지름: 262 μ m 새그값: 80 μ m	지름: 105.4 μ m, 50.6 μ m, 20.1 μ m 최대 새그값: 12.5 μ m
발표기관	Gwangju Institute of Science and Technology	Fraunhofer Institute for Silicon Technology	FEMTO-ST	
렌즈 물질	글래스	글래스	글래스	
제작방법	글래스 리플로우	글래스 플로우 프로세스	글래스 플로우 프로세스	
렌즈 치수	지름 : 960 μ m 새그값: 43 μ m	지름: 900 μ m 새그값: 80 μ m	지름: 1900 μ m 새그값: 80 μ m, 115 μ m, 150 μ m, 180 μ m	

제 3 절 렌즈 제작 연구의 필요성

1장 2절에서 기술한 연구동향에서 볼 수 있듯이 반도체 공정을 이용하여 렌즈를 제작하는 방법은 그 재료와 적용된 원리에 따라 다양하게 제안되었다. 기존 연구에 의해서 제안된 방법 중 감광막이나 PDMS와 같은 폴리머를 이용한 렌즈는 기계적으로 쉽게 마모가 되고 열에 취약하며 화학물질에 대해 내구성이 낮다는 인한 단점을 가지고 있다. 이에 대한 대안으로 기계적 마모에 대한 저항성, 화학적 내구성이 우수하며 투과도면에서 탁월한 성능을 보이는 글래스를 이용하여 제작한 렌즈가 많은 관심을 받고 있다[19]. 글래스를 이용한 렌즈는 글래스 리플로우, 레이저와 습식 식각을 이용한 제작법등 다양한 방법으로 이미 선행연구가 진행되었다. 그러나 볼록렌즈와 더불어 중요한 광학부품임에도 불구하고 대다수의 연구가 볼록렌즈를 제작하는 방법에 치우쳐 있어 상대적으로 오목렌즈에 대한 제작법은 부족한 것이 현실이다. 이전 선행 연구에서 오목렌즈를 제작하는 방법은 레이저 패터닝과 HF 습식식각을 이용한 방법이 대표적인데 이 방법은 mm이상의 큰 사이즈를 갖는 렌즈 제작이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 연구배경에서 기존에 제안되었던 반도체 공정을 이용한 글래스 오목렌즈 제작 방법의 단점을 보완한 새로운 오목렌즈 제작 방법을 제안할 필요가 있기 때문에 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정을 통해 글래스 오목렌즈를 제작하는 방법을 제안하고자 한다.

제 4 절 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장의 1절에서는 렌즈의 특성에 관한 식을 이용하여 평면오목렌즈를 대해 설계하였다. 2장의 2절에서는 설계한 렌즈를 제작하기 위한 공정에 관하여 설계를 하였으며 2장 3절에서는 2장 1절에서 설계한 렌즈를 2장 2절에서 설계한 공정방법을 이용하여 제작하는 과정과 그 결과를 단계별로 자세하게 설명하였다.

3장 1절에서는 2장에서 기술한 공정 방법으로 제작한 평면 오목렌즈를 측정하기 위한 방법에 대해서 기술하였으며 측정한 결과에 대해서 기술 하였다.

제 4장에서는 연구의 개요, 설계 및 제작, 렌즈의 특성 측정결과를 종합한 결론을 서술하였으며 이를 통해 본 논문이 가지는 의미에 대해서 서술하였다.

제 2 장 설 계 및 제 작

제 1 절 렌즈 설계

렌즈의 설계는 렌즈에 관한 광학공식을 이용하여 설계하였다. 렌즈 설계에 앞서 렌즈에 관한 광학공식에 대해 이해할 필요가 있다. 렌즈 설계에 사용된 관계식은 다음과 같은 원리로 유도된다[20].

특정 광원 S 에서 나온 빛은 렌즈를 통과하면서 굴절되고 이렇게 굴절된 빛은 포인트 P 에 모여 상을 이루게 된다. 이 과정에서 광축을 따라 통과한 빛과 렌즈 구면의 특정 포인트에서 통과, 굴절되어 P 로 향하는 빛은 같은 광로 길이(Optical Path Length , OPL)을 가져야 한다.

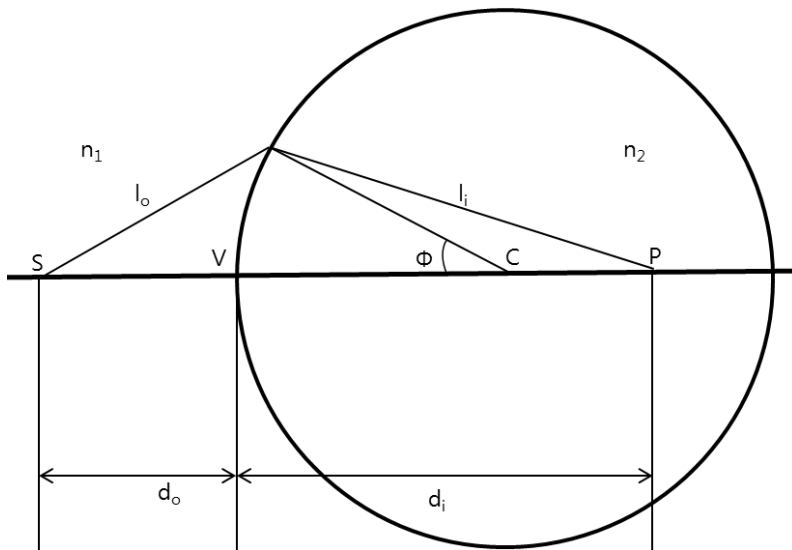


그림 2.1 구면에서의 굴절

빛이 굴절률 n_1 인 곳을 물리적 길이 l_o 만큼, 굴절률이 n_2 인 곳을 물리적 길이 l_i 만큼 지나간다고 할 때 이 빛이 지나는 광로길이는 페르마의 원리에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다

$$(optical\ path\ length) = n_1 l_o + n_2 l_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서 코사인법칙과 $COS\varphi = -COS(180-\varphi)$ 이용하면

$$l_o = [R^2 + (d_o + R)^2 - 2R(d_o + R) \cos \varphi]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$l_i = [R^2 + (d_i - R)^2 + 2R(d_i - R) \cos \varphi]^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

이것을 식(1)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 이 때 d_o 는 렌즈와 피사체 사이의 거리, d_i 는 렌즈와 상이 맺히는 점 사이의 거리, R 은 렌즈의 곡률반경, φ 는 렌즈 곡률반경의 중심과 굴절된 빛 사이의 각도를 의미한다.

$$OPL = n_1 [R^2 + (d_o + R)^2 - 2R(d_o + R) \cos \varphi]^{1/2} + n_2 [R^2 + (d_i - R)^2 + 2R(d_i - R) \cos \varphi]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

여기에서 φ 의 변화에 따른 광로 길이의 변화율은 0이므로 위 식을 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{n_1 R(d_o + R) \sin \varphi}{l_o} - \frac{n_2 R(d_i - R) \sin \varphi}{l_i} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

이 식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$(n_1 l_i + n_2 l_o)R + n_1 l_i d_o - n_2 l_o d_i = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left(\frac{n_2 d_i}{l_i} - \frac{n_1 d_o}{l_o} \right) \dots\dots\dots (7)$$

이 때 빛이 광축으로 가까이 근접하여 입사한다는 근축근사를

이용하면(즉, $\cos \varphi \approx 1$) $l_o \approx d_o, l_i \approx s_i$ 가 된다. 따라서 위의 식은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i} = \frac{n_2 - n_1}{R} \dots\dots\dots (8)$$

이 식을 이용한다면 렌즈제작자 공식을 유도할 수 있다.

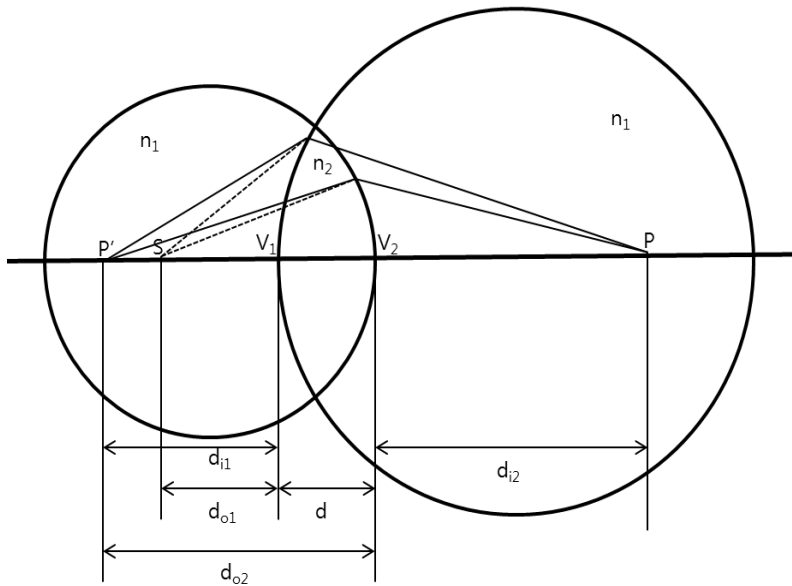


그림 2.2 얇은 렌즈에서의 굴절

렌즈의 제 1곡면에 대하여 위 식을 적용하면

$$\frac{n_1}{d_{o1}} + \frac{n_2}{d_{i1}} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 d_{o1} 은 제1곡면에서 피사체 사이의 거리, d_{i1} 은 제1곡면에서 상이 맺히는 점 사이의 거리, R_1 은 제1곡면의 곡률반경을 의미한다. 렌즈의 반대면인 제2곡면에 대해서도 같은 식을 대입하면

$$\frac{n_2}{d_{o2}} + \frac{n_1}{d_{i2}} = \frac{n_1 - n_2}{R_2} \dots\dots\dots (10)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이 때, d_{o2} 는 제2곡면과 피사체 사이의 거리, d_{i2} 는 제2곡면과 상이 맺히는 점 사이의 거리 R_2 는 제2곡면의 곡률반경을 의미한다. 제2곡면에 대한 식(10)을 제1곡면에서 사용한 d_{o1} , d_{i1} , d 등을 이용해 표현하면 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{n_2}{-d_{i1} + d} + \frac{n_1}{d_{i2}} = \frac{n_1 - n_2}{R_2} \dots\dots\dots (11)$$

제1곡면에 관한 식(9)와 제2곡면에 대한 식(11)을 더하면

$$\frac{n_2}{d_{o1}} + \frac{n_1}{d_{i2}} = (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_2 d}{(d_{i1} - d)d_{i1}} \dots\dots\dots (12)$$

가 된다. 여기서 렌즈의 두께가 매우 얇다고 하면 즉, $d \approx 0$ 이면 식에서 두번째 항은 소거되고, 렌즈 주위의 매질이 공기인 경우 n_1 은 1로 치환할 수 있다. 따라서 $d_{o1}=d_o$, $d_{i2}=d_i$ 로 놓으면 얇은 렌즈에 대한 방정식을 얻을 수 있으며 이것을 렌즈 제작자공식이라 한다.

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

을 얻을 수 있다. d_o 가 무한대로 이동한다면, 상이 맺히는 거리인 d_i 는 초점거리 f_i 가 되며 이것은

$$\lim_{d_o \rightarrow \infty} d_i = f_i \dots\dots\dots (14)$$

와 같이 되며, 마찬가지로 렌즈와 피사체간의 거리인 d_o 에 대해서도 $\lim_{d_i \rightarrow \infty} d_o = f_o$ 와 같이 표현할 수가 있다. 또한 얇은 렌즈의 경우에는

$f_i=f_o$ 가 되며, 식에서 f_o 를 f 로 나타내면,

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \dots\dots\dots (15)$$

가 된다. 식(15)는

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (16)$$

와 같이 표현할 수 있으며 이를 가우스 렌즈공식(Gaussian lens formula)이라고 한다.

초점거리는 렌즈의 성능을 나타내는 가장 기초적인 요소이다. 초점거리를 통해 화각 배율등 렌즈의 중요한 특징들이 결정되기 때문이다. 따라서 초점거리를 렌즈의 중요 설계 요소로 결정하고 이에 따라 필요한 렌즈의 치수를 설계하였다.

본 연구가 타겟으로 삼고 있는 어플리케이션은 자동차 전방거리측정용 카메라이다. 따라서 자동차 전방측정용 카메라에 삽입되는 렌즈의 지름은 2000 μ m를 갖도록 하였으며, -6.8mm의 초점거리를 갖도록 설계하였다. 이는 보통 자동차 전방거리측정용 카메라에 30°에서 45°사이의 화각을 갖는 렌즈가 삽입되는데 초점거리 -6.8mm를 갖게 되면 HD용 1/2.9인치의 CMOS 이미지 센서를 사용하였을 때 화각이 40°가 나오게 되기 때문이다. 이러한 결과는 아래의 식17을 이용하여 계산할 수 있다.

$$(Horizontal\ FoV) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{0.5 \times (width\ of\ image\ sensor)}{f} \right) \dots\dots\dots (17)$$

이를 이용하면 렌즈가 가져야 하는 새그값을 구할 수 있다. 새그값을 구하기 위해서는 먼저 렌즈의 곡률반경을 구해야 한다. 본 논문에서는

한쪽 면이 평면이므로 식(15)는 다음과 같이 표현되며 이를 이용하여 필요한 렌즈의 곡률반경을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{f} = \frac{(n-1)}{R} \dots\dots\dots (18)$$

이 때 f 는 렌즈의 초점거리, n 은 렌즈의 굴절률, R 은 렌즈의 곡률반경을 의미한다. 목표한 초점거리 -6.8mm 와 pyrex7740의 굴절률 1.47을 대입하여 식을 정리하여 렌즈의 곡률반경을 구하면 곡률반경 R 은 -3.196mm 가 되어야 한다. 이렇게 구한 곡률반경을 이용하면 렌즈가 가져야 하는 새그값을 알 수 있다. 렌즈의 새그값 h 에 관한 공식은 다음과 같이 유도된다. 그림 2.13에서 볼 수 있듯이 렌즈의 곡률반경 R 을 빗변으로 하는 삼각형을 그릴 수 있다.

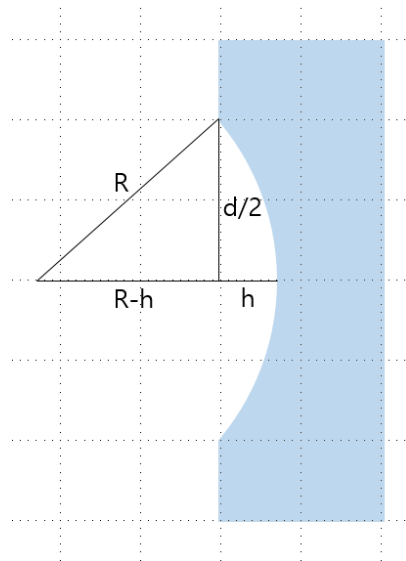


그림 2.3 렌즈의 곡률반경, 지름, 새그값의 관계

이를 이용하여 식으로 표현하면

$$R^2 = (R-h)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (19)$$

과 같이 표현할 수 있다. 이때 h 는 렌즈의 새그값, R 은 렌즈의 곡률반경,

D 는 렌즈의 지름을 나타낸다. 이 식을 풀어서 h 에 관하여 정리하면 곡률반경과 지름을 통해 렌즈의 새그값을 구하는 식을 유도할 수 있다.

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} > 0 \dots\dots\dots (20)$$

식 (20)을 이용하여 렌즈의 새그값을 구하면 $2000\mu\text{m}$ 의 지름과 곡률반경 -3.196mm 를 가지는 렌즈의 새그값은 $160\mu\text{m}$ 가 된다.

표 2.1 렌즈의 설계 목표값

	목표값
초점거리	-6.8mm
곡률반경	-3.196mm
지름	$2000\mu\text{m}$
새그값	$160\mu\text{m}$

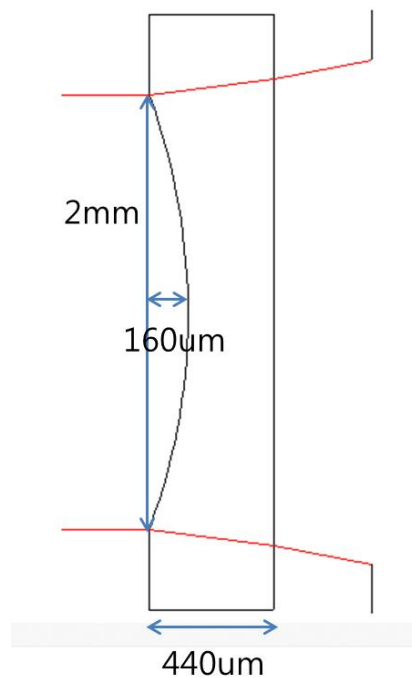


그림 2.4 설계한 렌즈의 치수

제 2 절 공정 설계

글래스 리플로우란 글래스의 점도가 낮아져 변형될 수 있도록 글래스를 가열하여 가공하는 기술이다. 이러한 글래스 리플로우를 이용하여 렌즈를 제작할 시 동일한 공정조건을 가지는 렌즈를 다수 만들 수 있으며 한 장의 마스크만을 이용하여 제작이 가능하기 때문에 비용적인 측면에서 효율적이라는 장점이 있다. 또한 mm이상의 크기를 갖는 오목렌즈의 제작이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 장점들을 활용하기 위하여 글래스 리플로우를 이용해 오목렌즈를 제작하기 위한 공정 설계를 하였다.

글래스 리플로우를 이용한 오목렌즈 제작에서 중요한 공정 요소 중 하나는 실리콘-글래스-실리콘 구조의 삼층 양극 접합이다. 글래스 웨이퍼 위에 본딩되는 실리콘 웨이퍼는 글래스 윗면에 형성되는 오목렌즈의 지름을 원하는 크기로 만들어주는 역할을 한다. 또한 관통공정을 진행함으로써 글래스 웨이퍼 아래에 본딩된 실리콘 웨이퍼와 압력차이를 제공하여 글래스 리플로우를 진행할 때 글래스가 실리콘 캐비티안으로 들어가는 역할을 한다. 글래스 아래의 실리콘 웨이퍼는 글래스와 진공으로 본딩되어 글래스 웨이퍼가 가열되었을 때 글래스 웨이퍼 위 실리콘 웨이퍼에 관통된 부분과 글래스 웨이퍼 아래 실리콘 웨이퍼의 캐비티간의 압력 차이로 인해 글래스가 캐비티 안으로 들어갈 수 있도록 하는 역할을 한다.

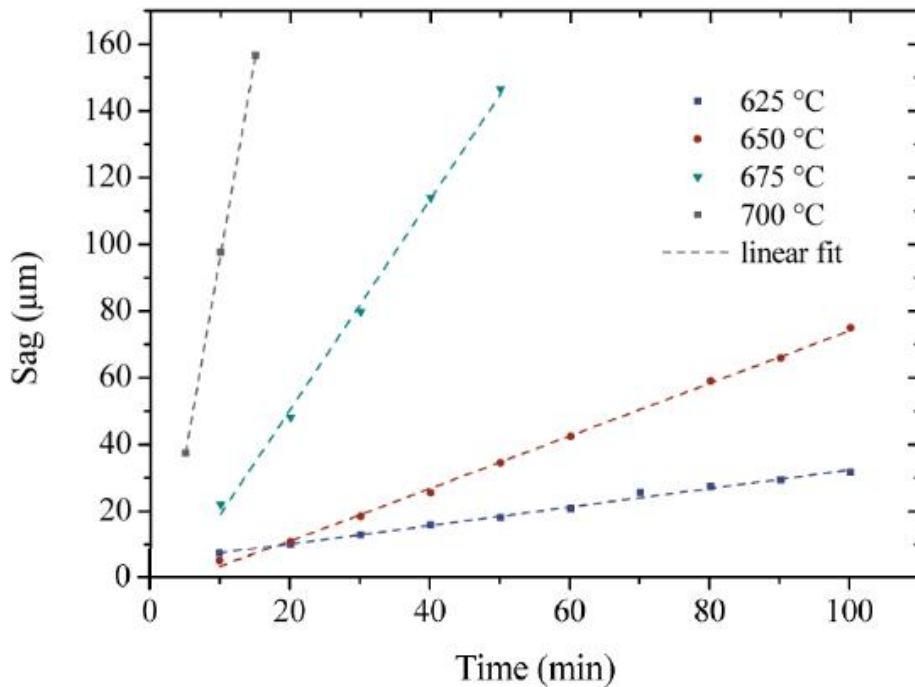


그림 2.5 글래스 플로우 프로세스 온도-시간 그래프 [15]

글래스 리플로우에 사용한 온도는 675°C이다. 이 온도는 참고문헌[15]을 통해 결정하였다. 그림 2.5는 본 논문에서 글래스 리플로우에 필요한 온도와 시간을 결정하는데 참고하였던 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 675°C 이상의 온도에서는 시간 변화에 따른 새그값의 변화율이 높아 정교한 새그값의 컨트롤이 힘들고 675°C 이하의 온도에서는 시간 변화에 따른 새그값의 변화율이 낮아 공정시간이 오래 걸리게 된다. 따라서 본 논문에서는 675°C를 글래스 리플로우 온도로 결정하였고 타겟 새그값을 위한 글래스 리플로우 시간으로 40분을 설계하였다. 참고로 하였던 연구에서는 글래스 리플로우를 진행하는 과정에서 20°C/min의 속도로 퍼니스를 상·하온 하였으나 본 논문에서 공정을 진행한 반도체공동연구소에서 사용하는 미니 퍼니스의 경우 분당 5°C의 속도로 상온 하기 때문에 실제 녹는점에서 675°C까지 상온 하는데 30분이라는 시간이 소요된다. 또한

하강하는 속도는 분당 8.3°C 이기 때문에 하온 과정에서 18분이라는 시간이 더 소요가 되었다. 그렇게 때문에 675°C 에서 유지하는 온도를 5분으로 설정하였다.

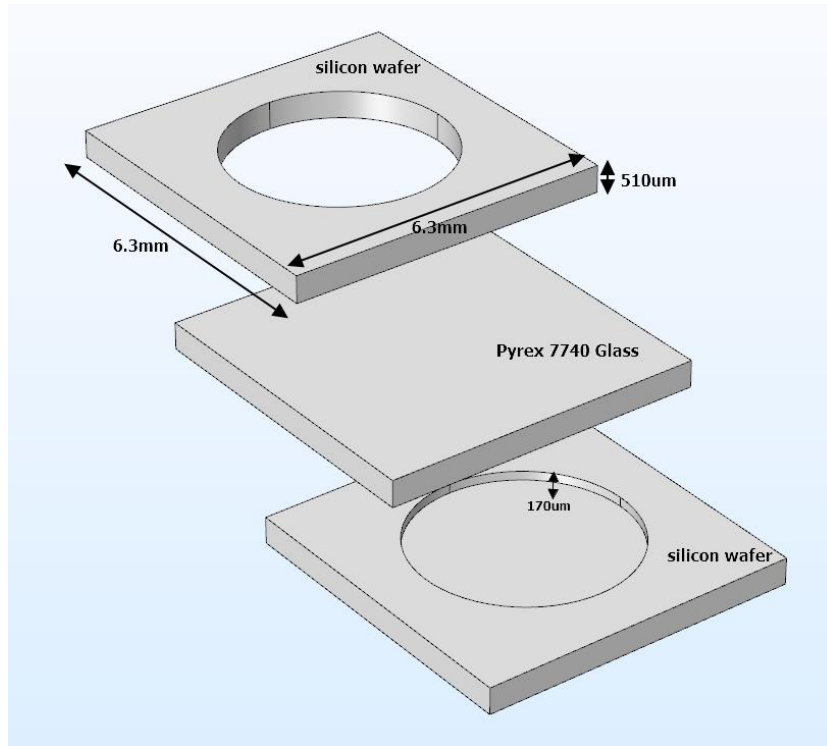


그림 2.6 설계한 공정의 3차원 모식도

제 3 절 제작

본 연구에서는 MEMS 공정을 이용하여 평면 오목렌즈를 제작하였다. 그림 2.7은 공정에 관한 흐름도를 나타낸다.

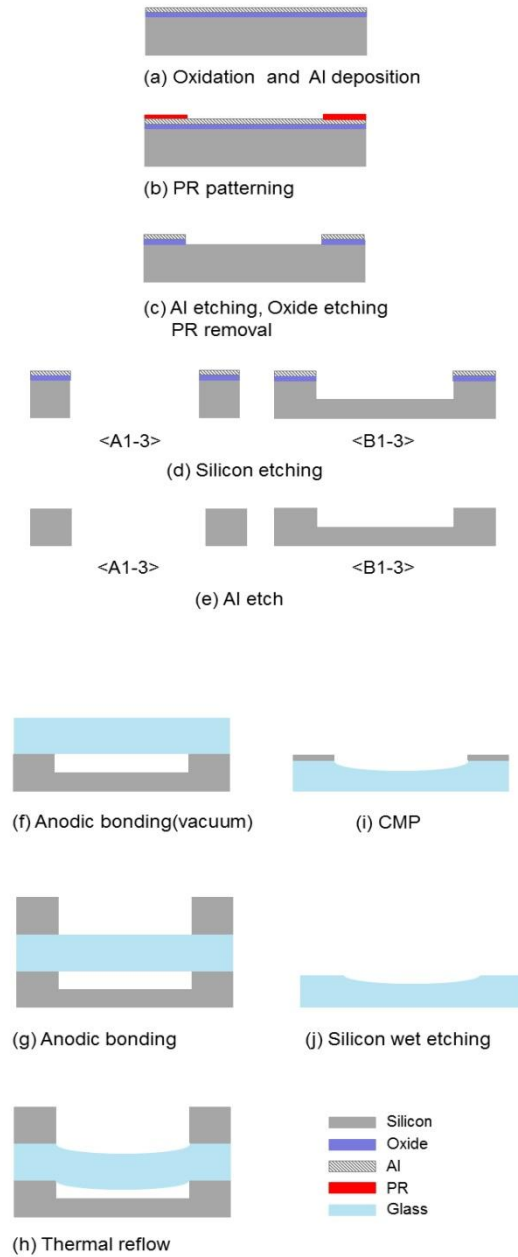


그림 2.7 공정 흐름도

본 연구에서는 단면 폴리싱된 (100)방향의 실리콘 웨이퍼와 pyrex7740 웨이퍼를 이용하여 평면 오목렌즈를 제작하였다. 양극 접합과 글래스 리플로우는 높은 온도를 가하는 공정이기 때문에 글래스와 실리콘 웨이퍼 사이에 열팽창 계수 차이가 크면 그만큼 구조물에 스트레스가 가해지게 되고 그 결과 본딩된 웨이퍼에 보(Bow)나 크랙과 같은 구조적인 문제를 일으킬 수 있다[21]. 이를 방지하기 위해서 실리콘과 열팽창 계수가 비슷하여 양극 접합이나 글래스 리플로우에서 발생할 수 있는 문제를 최소화 할 수 있는 pyrex7740 웨이퍼를 사용하였다[22].

본 연구에서 사용된 pyrex7740의 특성은 표2.1에서 정리하였다.

표 2.1 Pyrex7740 웨이퍼의 물질 특성

특성	
Coefficient of Expansion	$32.5 \times 10^{-7} \text{cm/cm/}^{\circ}\text{C}$
Strain point	510°C
Anneal point	560°C
Soften point	821°C
Density	2.23g/cm^3
Young' s modulus	$6.4 \times 10^3\text{kg/mm}^2$
Refractive index	1.474
Pyrex7740의 구성 물질	
SiO_2	80.6%
B_2O_3	13.0%
Na_2O	4.0%
Al_2O_3	2.3%
Miscellaneous traces	0.1%

실리콘 웨이퍼의 경우 CMP공정의 후속공정인 KOH 습식 식각에서

원활한 습식 식각을 위해 KOH에 의한 식각률이 높은 단면 폴리싱된 4인치 (100)방향의 실리콘 웨이퍼가 사용되었다.

먼저 준비된 실리콘 웨이퍼와 pyrex7740 글래스 웨이퍼 표면에 있을 유기 오염물을 제거하기 위해 황산(H_2SO_4)과 과수(H_2O_2)를 4:1비율로 혼합하여 SPM 클리닝공정을 10분간 진행한다. SPM 클리닝이 끝난 실리콘 웨이퍼에 TEOS(Tetraethylorthosilicate) CVD를 이용하여 300nm의 산화막을 증착하고 증착한 산화막 위에 evaporator를 이용하여 300nm의 알루미늄을 증착한다. 이렇게 증착한 산화막과 알루미늄은 DRIE를 위한 하드 마스크로 이용된다. 산화막과 알루미늄이 증착된 웨이퍼 위에 AZ5214 감광막을 이용하여 음각사진공정을 진행한다. AZ5214는 500rpm에서 5초, 4000rpm에서 35초 스핀 코팅을 한 뒤 95℃에서 3분 30초 소프트 베이크한다. 그 후 얼라이너를 이용하여 노광을 진행한다. 그리고 95℃에서 2분 30초 PEB(Post Exposure Bake)를 진행한 뒤 Flood exposure를 진행한다. 그 이후 AZ300을 DI water와 6:1비율로 섞어 2분간 현상한다. 이때 중요한 것은 AZ300용액과 DI water를 섞은 용액을 현상하기 전에 충분히 저어서 잘 섞어야 한다는 것이다. 그리고 115℃에서 2분 동안 하드 베이크를 진행한다. 사진 공정이 진행된 이후 알루미늄 층을 RIE(Reactive Ion Etching)를 이용하여 건식 식각 한다. 이 때 Cl_2 10sccm, BCl_3 40sccm, 50mTorr, 100W의 RF 전력을 이용하여 3분 45초 진행한다. 알루미늄 아래의 산화막 층은 건식 식각을 통해 패터닝을 한다. 그림 2.8은 산화막 건식 식각을 진행한 후 패터의 모습이다. 주변의 회색은 알루미늄 하드 마스크를 나타내며 원형 모양의 파란 부분은 실리콘이 나타난 모습이다.

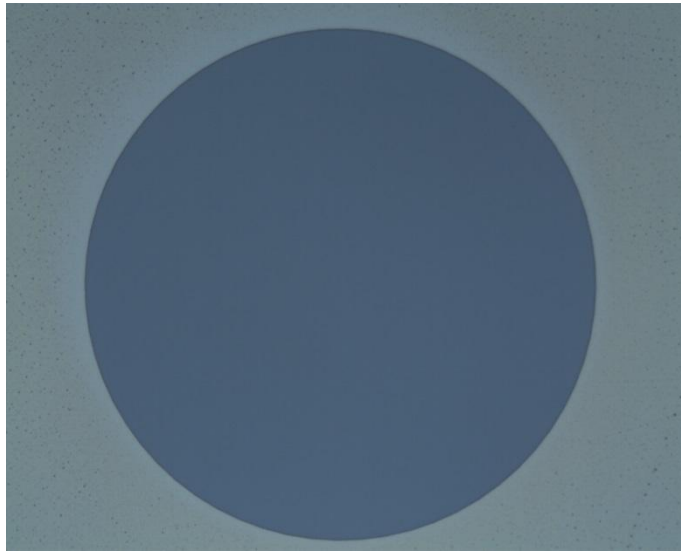


그림 2.8 산화막 식각이 끝난 후 패턴

이후 알루미늄과 산화막을 패턴닝 하기 위해 사용하였던 감광막을 ST-2000 감광막 제거제를 이용하여 제거한다. 알루미늄 마스크과 산화막 층이 패턴닝된 실리콘 웨이퍼에 $170\mu\text{m}$ 의 캐비티를 형성하기 위해 DRIE공정을 진행한다. DRIE 공정에는 Bosch535 프로세스를 이용하였다. DRIE 공정은 1차로 타겟인 $170\mu\text{m}$ 의 70%정도인 $119\mu\text{m}$ 를 식각 한 뒤 1차 DRIE를 통해 얻은 식각률을 이용하여 2차 DRIE를 진행하였다. 1차 DRIE공정의 결과와 식각률과 최종 DRIE공정 결과 표 2.2과 표 2.3에 정리하였다. 또 다른 실리콘 웨이퍼는 DRIE를 450loop 진행하여 관통한다.

표 2.2 1차 DRIE 공정 결과

	웨이퍼#1	웨이퍼#2	웨이퍼#3
T	115.4	16.9	117.8
C	118.7	119	120.7
B	117.7	119.5	119.5
L	117.7	119.5	119.2
R	118.1	120.8	119.6

표 2.3 DRIE 최종 결과

	웨이퍼#1	웨이퍼#2	웨이퍼#3
총 loop수	134	132	131
식각 깊이(μm)	171.1	170.7	170.5
식각률($\mu\text{m}/\text{loop}$)	1.28	1.29	1.30

알루미늄은 SPM 용액에 5200nm/min의 식각률을 갖기 때문에 [23] DRIE 공정이 끝난 후 SPM 용액에 1분, 산화막은 HF용액에 1분간 습식 식각을 진행하여 DRIE를 위해 사용한 마스크 층을 제거한다.

170 μm 의 캐비티가 형성된 실리콘 웨이퍼, pyrex7740, 관통공정이 진행된 실리콘 웨이퍼를 삼층 양극 접합한다. 먼저 170 μm 의 캐비티가 형성된 실리콘 웨이퍼를 350 $^{\circ}\text{C}$, $1.2 \times 10^{-2}\text{Torr}$ 의 조건에서 pyrex7740과 양극 접합한다. 1차 본딩이 완료된 후 관통공정이 진행된 실리콘 웨이퍼와 양극 접합한다



그림 2.9 삼층 양극 접합이 완료된 후

그림 2.9는 삼층 양극 접합이 완료된 웨이퍼의 사진이다.

삼층 양극 접합한 웨이퍼를 미니 퍼니스를 이용하여 675 $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분의 공정조건을 가지고 글래스 리플로우를 진행한다. 글래스 리플로우를 진행한 웨이퍼는 CMP를 이용하여 실리콘 웨이퍼를 제거한다.

Pyrex7740 웨이퍼의 아래쪽 실리콘 웨이퍼와 글래스 리플로우로 인해 실리콘 캐비티안으로 형성된 볼록 모양의 글래스를 CMP를 통해 평평한 형태로 만들어 준다. Pyrex7740 웨이퍼 위쪽에 본딩되어 있는 실리콘 웨이퍼의 경우 CMP를 이용하여 실리콘을 모두 제거할 경우 형성된 렌즈에 영향을 줄 수 있기 때문에 $50\mu\text{m}$ 의 실리콘을 남긴 채 CMP공정을 한다. 이렇게 남은 $50\mu\text{m}$ 의 실리콘 웨이퍼는 80°C 의 온도에서 20wt%의 KOH용액을 이용하여 30분 동안 습식 식각을 진행한다. 이 때 KOH에 의한 실리콘 웨이퍼의 습식 식각률은 약 $1.6\mu\text{m}/\text{min}$ 이었다. KOH 습식 식각 진행 후 남은 글래스 웨이퍼는 SC-1, SC-2 클리닝과 아세톤, IPA 클리닝을 한다. 최종적으로 평면 오목렌즈가 형성된 pyrex7740 웨이퍼를 다이싱함으로써 공정을 마무리한다.

그림 2.10는 최종 제작한 평면 오목렌즈의 사진이다. 제작한 렌즈는 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 의 크기에 $2000\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 오목한 형태의 렌즈이다.



그림 2.10 최종 제작된 평면 오목렌즈

제 3 장 측 정 및 분 석

제 1 절 측정 방법

렌즈의 표면 형상은 알파스텝을 이용하여 측정하였다. 그리고 렌즈의 새그값과 지름은 현미경 깊이 측정기를 이용하여 측정하였다. 렌즈는 빛을 투과하기 때문에 광학현미경을 이용한 새그값 및 지름을 측정하는데 있어 일반적인 샘플의 표면을 측정하는 방법으로는 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 렌즈의 표면에 크롬층을 300nm 증착하여 빛이 투과하지 않도록 한 뒤 현미경 깊이 측정기를 이용하여 렌즈의 새그값과 지름을 측정하였다.

표 3.1 측정에 사용된 장비

사용된 장비	모델 명(제조회사)	장비특성
Alpha step	Nanospec AFT/200 (KLA-TENCOR)	Vertical range : 50nm~300 μm Sampling rate : 50,100 or 200Hz
Depth measurement	STM6 (Olympus)	(Accuracy) < 1 μm

제 2 절 측정 결과

그림 3.1은 제작된 렌즈를 이용하여 찍은 상의 모습이다. 오목렌즈의 특징인 실제 피사체보다 축소된 정립허상을 나타내고 있다. 그림 3.2은 현미경을 이용하여 렌즈를 본 모습이며 그림 3.3는 직선으로 향하는 레이저 광선이 오목 렌즈에 의해서 휘어진 모습을 나타낸 그림이다. 오목렌즈의 특징인 가장자리로 광선이 휘는 모습을 보여주고 있다.

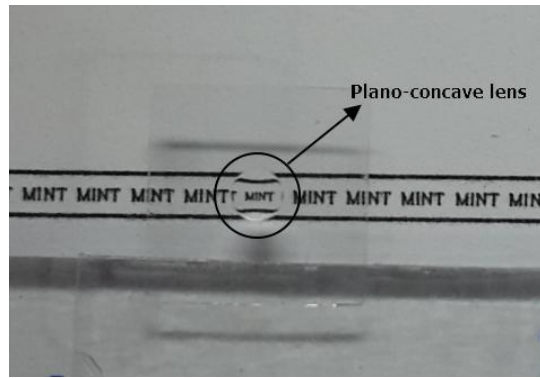


그림 3.1 제작한 렌즈를 통해 촬영한 이미지

그림 3.2에서는 그림 3.3에서 보듯이 레이저의 가장자리로 향한 빛은 굴절이 되어 렌즈의 바깥쪽으로 휘기 때문에 렌즈의 가장자리 부분은 빛이 굴절되어 어둡게 보이며 렌즈의 중심부에는 광축을 따라 통과한 빛으로 인해 밝게 보이는 모습을 나타내고 있다. 이를 통해 제작된 렌즈가 오목렌즈의 특성을 가짐을 알 수 있다.

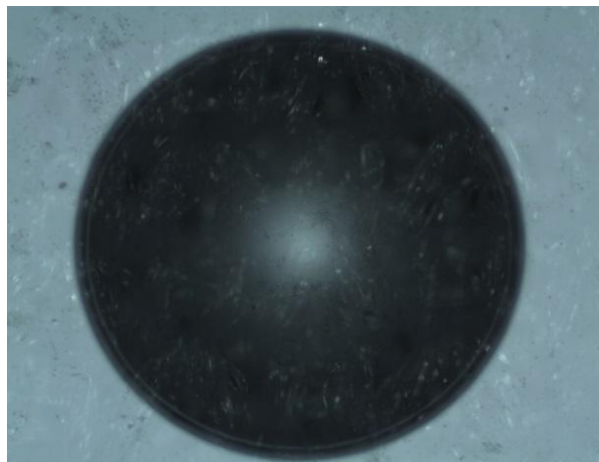


그림 3.2 현미경을 통해 본 평면 오목렌즈

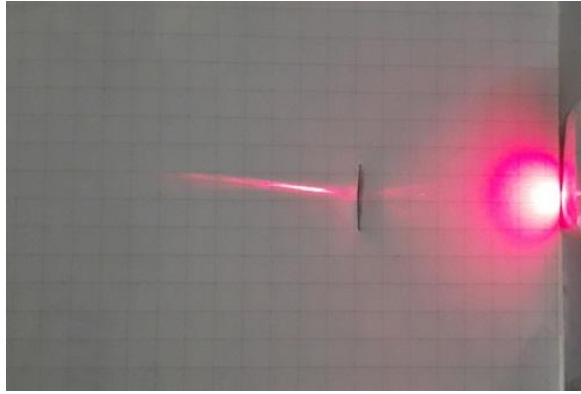


그림 3.3 평면 오목렌즈에 의해 레이저 광선이 굴절된 모습

알파스텝을 이용하여 측정한 렌즈의 표면 형상은 그림 3.4에 표현하였다. 그림 3.4에서 볼 수 있듯이 표면 형상 측정 결과 렌즈는 포물선 모양의 형상을 보이고 있다.

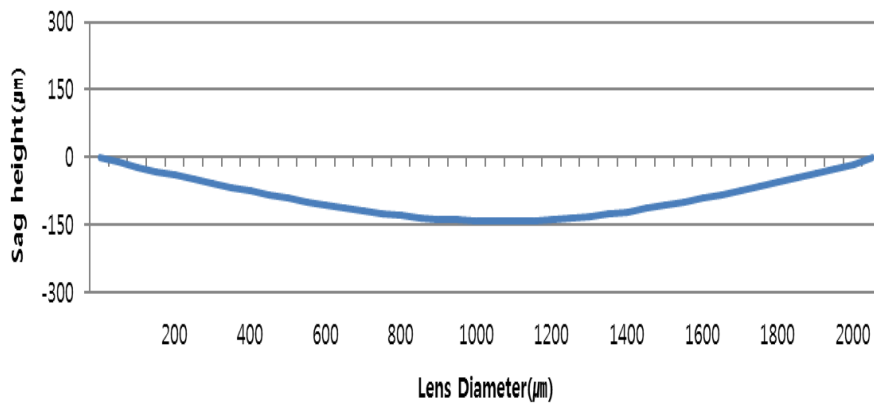


그림 3.4 렌즈의 표면 형상

3장 1절에서 기술한 바와 같이 렌즈에 300nm의 크롬을 증착하고 현미경 깊이 측정기를 이용하여 렌즈의 새그값과 지름을 측정하였으며 이 결과를 광학 공식에 대입하여 렌즈의 초점거리를 구하였다. 오목렌즈에 크롬을 증착하여 측정한 새그값과 지름을 표 3.2에 정리하였다. 표에서 볼 수 있듯이 완성된 렌즈 새그값의 평균값은 $163.8\mu\text{m}$, 지름의 평균값은 $2008\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 타겟으로 하였던

160 μm 와의 오차 평균은 2.38%의 결과를 보였다. 렌즈 초점거리에 대한 측정 결과는 표 3.3에 정리하였으며 측정된 초점거리의 평균값은 -6.7mm를 나타내었다.

표3.2 오목렌즈의 새그값과 지름 측정결과

Die No.	새그값(μm)	오차(%)	지름(μm)	오차(%)
#1	159.2	-0.50	2007	0.35
#2	168.4	5.25	2008	0.40
평균값	163.8	2.38	2008	0.40

표3.3 오목렌즈의 초점거리 측정결과

Die No.	초점거리(mm)	목표타겟(mm)	타겟과의 오차(%)
#1	-6.9	-6.8	1.47
#2	-6.5	-6.8	4.41
평균값	-6.7	-6.8	1.47

본 논문에서 제안된 방법으로 오목렌즈를 제작하였을 때 한 웨이퍼 내에서 새그값에 대한 균일도가 떨어진다는 문제가 있다. 이 문제의 원인으로서는 캐비티가 있는 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼간의 진공 접합과정에서 렌즈가 형성되는 패턴간의 진공도가 달라 졌기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한 렌즈의 새그값 변화에 영향을 미치는 글래스의 점도는 온도에 따라 지수 함수적으로 변하기 때문에[24] 각 패턴에서의 온도 차이가 새그값 균일도에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 개선하기 위해서는 세밀한 공정조건 제어가 필요로 하며 진공도와 온도가 렌즈공정에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

제 4 장 결 론

본 논문은 MEMS공정을 이용하여 평면 오목렌즈를 제작하는 방법에 대해 제안하였다. 렌즈에 관한 광학공식을 이용하여 렌즈를 설계하였다. 설계한 렌즈를 제작하기 위해 4인치 (100) 실리콘 웨이퍼에 관통공정을 진행하였으며 또 다른 실리콘 웨이퍼에 $170\mu\text{m}$ 의 캐비티를 형성하였다. 이렇게 준비된 실리콘 웨이퍼 중에 캐비티가 형성된 실리콘과 pyrex7740 글래스 웨이퍼는 1.2×10^{-2} Torr의 진공도에서 본딩을 하였고, 그 후 관통된 실리콘 웨이퍼와 두번째 양극 접합을 하였다. 진공 본딩된 캐비티내의 압력과 글래스 웨이퍼 위에 본딩된 실리콘의 관통된 부분과의 압력 차이로 인해 웨이퍼를 가열할 시 캐비티안으로 글래스가 들어가고 글래스 웨이퍼의 위쪽에는 오목한 렌즈의 형상이 만들어지게 된다. 글래스 리플로우를 진행한 후 CMP를 이용하여 캐비티가 형성된 실리콘 웨이퍼를 모두 제거하고 캐비티안으로 들어가 형성된 글래스의 볼록한 부분도 제거를 한다. 그리고 위쪽에 본딩된 실리콘 웨이퍼를 $50\mu\text{m}$ 를 남겨둔 채 CMP공정을 진행한다. 남은 $50\mu\text{m}$ 의 실리콘은 KOH로 완전히 제거하게 된다. 이렇게 제작된 초점거리에 관한 광학 공식과 알파스텝을 이용하여 그 특성을 측정하였다. 렌즈의 평균 새그값은 $163.8\mu\text{m}$ 이며 -6.7mm 의 초점거리를 가졌다.

볼록렌즈와 같이 중요 광학부품임에도 불구하고 글래스를 이용한 오목렌즈 제작법은 볼록렌즈 제작법에 비해 연구가 많이 진행되지 않았다. 제안되었던 기존 오목렌즈 제작 연구는 레이저 패터닝과 HF 습식 식각을 결합한 방법 정도가 대표적이었다. 많은 분야에서 mm 이상의 크기를 갖는 렌즈를 필요로 하기 때문에 본 논문에서는 mm이상의 오목렌즈를 제작하기 위하여 글래스 리플로우와 삼층 양극 접합을 이용한 오목렌즈 제작 방법을 제안하였다. 본 논문은 MEMS공정을 통하여 단일한 공정조건에서 렌즈를 형성할 수 있으며

그를 통해 mm 크기의 오목렌즈를 제작하는 새로운 방법을 제안했다는 점에서 그 의미를 가진다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Yang, Hsiharng, et al. "High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process." *Journal of micromechanics and microengineering* 14.8 (2004): 1197.
- [2] He, Miao, et al. "Fabrication of concave refractive microlens arrays in solgel glass by a simple proximity-effect-assisted reflow technique." *Optics letters* 29.9 (2004): 1007–1009.
- [3] Ruffieux, Patrick, et al. "Two step process for the fabrication of diffraction limited concave microlens arrays." *Optics express* 16.24 (2008): 19541–19549.
- [4] MacFarlane, D. L., et al. "Microjet fabrication of microlens arrays." *IEEE photonics technology letters* 6.9 (1994): 1112–1114.
- [5] Xia, Zehua, et al. "Fabrication of polymer compound microlens by lens-on-lens microstructures." *Current Applied Physics* 17.1 (2017): 110–114.
- [6] Ong, N. S., Y. H. Koh, and Yong Qing Fu. "Microlens array produced using hot embossing process." *Microelectronic Engineering* 60.3 (2002): 365–379.
- [7] Albero, Jorge, et al. "Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques." *Optics express* 17.8 (2009): 6283–6292.
- [8] Huang, Tzu-Chien, et al. "Fabrication of microlens arrays using a CO₂-assisted embossing technique." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 19.1 (2008): 015018.
- [9] Tomasko, David L., et al. "A review of CO₂ applications in the processing of polymers." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42.25 (2003): 6431–6456
- [10] Yao, Jun, et al. "Refractive micro lens array made of

dichromate gelatin with gray-tone photolithography." *Microelectronic Engineering* 57 (2001): 729–735.

[11] Totsu, Kentaro, and Masayoshi Esashi. "Gray-scale photolithography using maskless exposure system." *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 23.4 (2005): 1487–1490.

[12] Albero, J., et al. "Si moulds for glass and polymer microlenses replication." *Photonics Europe*. International Society for Optics and Photonics, 2008.

[13] Lee, Sung-Kil, et al. "A glass reflowed microlens array on a Si substrate with rectangular through-holes." *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 10.4 (2008): 044003.

[14] Merz, P., et al. "A novel micromachining technology for structuring borosilicate glass substrates." *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on, 2003*. Vol. 1. IEEE, 2003.

[15] Albero, Jorge, et al. "Dense arrays of millimeter-sized glass lenses fabricated at wafer-level." *Optics express* 23.9 (2015): 11702–11712.

[16] Yoo, Sunghyun, et al. "Square-shaped glass microlens array for fiber-optic neurostimulation." *Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), 2016 International Conference on*. IEEE, 2016.

[17] Chen, Feng, et al. "Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method." *Optics express* 18.19 (2010): 20334–20343.

[18] Lim, C. S., et al. "Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching." *International journal of machine tools and manufacture* 46.5 (2006): 552–558.

- [19] Park, Kwang-Bum, and Seon-Ju Kim. "Fabrication of Glass Microlens using Thermal Reflow Methods." *Proceedings of the KIEE Conference*. The Korean Institute of Electrical Engineers.
- [20] 김일곤, 이성수, 장기완. 물리 광학. 2011. 북스힐
- [21] Harz, Michael, and Heinrich Engelke. "Curvature changing or flattening of anodically bonded silicon and borosilicate glass." *Sensors and Actuators A: Physical* 55.2-3 (1996): 201-209.
- [22] Elwenspoek, Miko, and Henri V. Jansen. *Silicon micromachining*. Vol. 7. Cambridge University Press, 2004.
- [23] Williams, Kirt R., Kishan Gupta, and Matthew Wasilik. "Etch rates for micromachining processing-Part II." *Journal of microelectromechanical systems* 12.6 (2003): 761-778.
- [24] Rienstra, S. W., and T. D. Chandra. "Analytical approximations to the viscous glass-flow problem in the mould-plunger pressing process, including an investigation of boundary conditions." *Journal of Engineering Mathematics* 39.1 (2001): 241-259.

Abstract

Fabrication method of plano concave lens using glass reflow process

MinSung Kim

Department of Electrical
And Computer Engineering
The Graduate School
Seoul National University

The lens is an instrument that magnifies or minifies the image by converging or diverging light. These lenses are used in many fields such as daily life, scientific research, medical, aerospace and further expanding in this area.

Generally, the lens is formed by grinding process, but since the necessity of a micro-lens having a small size is become essential, studies on fabrication methods using a semiconductor fabrication process are actively proceeding. Among them, many studies have been made on the production of lenses using polymers such as PR, PDMS and researches on methods for manufacturing lenses using glass have been actively carried out.

However, research on manufacturing glass lens has more portion of convex lens than concave lens and it is a fact that the research on manufacturing concave lenses is lacking in spite of being one of

the important optical parts. Therefore, this paper proposed the method of manufacturing concave lens using the semiconductor fabrication process.

The lens was designed using the optical equation that describes optical properties of the lens. The procedure for fabricating the lens using glass reflow process with one mask was designed and performed.

The process used two silicon wafers and one pyrex7740 glass wafer. One silicon wafer forms a $170\mu\text{m}$ cavity with DRIE, another silicon wafer conducts the penetration process. The prepared silicon wafers and pyrex7740 glass wafer were anodically bonded and followed by a glass reflow process at 675°C for 5 minutes so that the glass wafer can be deformed. At this time, the pressure difference between a penetrated silicon wafer on the pyrex7740 glass wafer and a silicon wafer with cavity below the glass wafer formed a concave lens.

The surface profile, sag height and diameter of fabricated lens were measured using alpha step and depth measurement. The measured lens has an average diameter of $2008\mu\text{m}$, an average sag height of $163.8\mu\text{m}$, and an average focal length of -6.7mm respectively.

This paper proposes new MEMS fabrication method of creating lens with accurate dimension control in unitary condition.

Keywords : Plano concave lens, Glass Reflow Process, Triple anodic bonding, Lens equation

Student Number : 2015–20894